中国生态农业学报 2017 年 1 月 第 25 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2017, 25(1): 55−60

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160687

刘紫娟, 李萍, 宗毓铮, 董琦, 郝兴宇. 大气 CO_2 浓度升高对谷子生长发育及玉米螟发生的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 55−60
Liu Z J, Li P, Zong Y Z, Dong Q, Hao X Y. Effect of elevated [CO_2] on growth and attack of Asian corn borers (*Ostrinia furnacalis*) in foxtail millet (*Setaria italica*)[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 55−60

大气 CO_2 浓度升高对谷子生长发育及玉米螟发生的影响*

刘紫娟, 李 萍, 宗毓铮, 董 琦, 郝兴宇**

(山西农业大学农学院 太谷 030801)

摘 要: 人类活动导致全球大气 CO_2 浓度持续升高, 研究大气 CO_2 浓度升高对 C_4 作物谷子(*Setaria italica*)生长发育及虫害发生的影响, 可以为谷子等 C_4 作物制订应对气候变化栽培措施提供理论依据。本研究利用 OTC (Open Top Chamber)系统, 设两个 CO_2 浓度梯度(正常大气 CO_2 浓度、正常 CO_2 浓度+200 μmol·mol^{-1})模拟 CO_2 浓度升高对谷子生长发育的影响。结果表明: 大气 CO_2 浓度升高后, 谷子净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)、叶片蒸腾速率(T_r)和水分利用率(WUE)分别增加 38.73%、27.53%、6.93%和 40.56%; 谷子叶片光系统 II 最大光化学量子产量(F_v/F_m)和非光化学淬灭系数(NPQ)显著下降, 光系统 II 实际光化学量子产量(Φ_{PSII})和表观电子传递效率(ETR)显著增加, 而对光化学淬灭系数(qP)无显著影响; 此外, 谷子株高、茎粗和小穗数分别增加 3.41%、13.28%和 13.11%; 而叶重、茎重、千粒重、单株粒数和产量无显著变化, 穗重和地上部分生物量分别显著下降 12.8%和 7.44%; 大气 CO_2 浓度升高后, 谷子灌浆期和收获期玉米螟(*Ostrinia furnacalis*)发生数量显著增加。大气 CO_2 浓度升高将有利于谷子的生长发育, 但会增加玉米螟危害。

关键词: CO_2 浓度升高; 谷子; 光合作用; 产量; 玉米螟
中图分类号: S162.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)01-0055-06

Effect of elevated [CO_2] on growth and attack of Asian corn borers (*Ostrinia furnacalis*) in foxtail millet (*Setaria italica*)*

LIU Zijuan, LI Ping, ZONG Yuzheng, DONG Qi, HAO Xingyu**
(College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: Since industrial revolution, global atmospheric carbon dioxide (CO_2) concentration ([CO_2]) has risen from 280 μmol·mol^{-1} to the current level of about 392 μmol·mol^{-1}. Foxtail millet (*Setaria italica*) is one of the most important C_4 crops in the semiarid regions of North China, yet there is lack of sufficient information on how the crop responds to climate change in China. Here, we studied the effects of elevated atmospheric [CO_2] on foxtail millet in order to understand the changes in foxtail millet production under future CO_2 concentrations along with the response of C_4 crops to climate change. An open top chamber (OTC) system was used to test the effect of elevated [CO_2] on foxtail millet. One OTC was used as the control chamber, which maintained the ambient [CO_2]. In another OTC, elevated [CO_2] (ambient [CO_2] + 200 μmol·mol^{-1}) was constantly

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题(2012CB955904)、国家科技支撑计划项目(2013BAD11B03-8)、山西省科技攻关计划项目(20150311006-2)、国家自然科学基金项目(31601212, 31501276)和山西农业大学博士引进人才项目(2013YT05)资助
** 通讯作者: 郝兴宇, 主要从事农业气象及气候变化对农业影响研究。E-mail: haoxingyu1976@126.com
刘紫娟, 主要从事植物生理生态方面研究。E-mail: 1019313693@qq.com
收稿日期: 2016-08-07 接受日期: 2016-10-05

* This work was supported by the National Program of Key Basic Research Project of China (973 Program) (2012CB955904), the National Key Technology R&D Program of China (2013BAD11B03-8), Shanxi Province Scientific and Technological Projects (20150311006-2), the National Natural Science Foundation of China (31601212, 31501276) and Shanxi Agricultural University Doctor Introduce Talents Projects (2013YT05).
** Corresponding author, E-mail: haoxingyu1976@126.com
Received Aug. 7, 2016; accepted Oct. 5, 2016

maintained from crop emergence to harvest. Foxtail millet was sown in 40 cm × 60 cm pots (28 cm depth). Ten plants were grown in each pot and 10 pots were put in every OTC. Leaf photosynthesis was measured using a portable gas exchange system. Chlorophyll fluorescence parameter was assessed using a miniaturized pulse-amplitude modulated fluorescence analyzer with a leaf clip holder. The changes in morphological parameters, biomass, yield and damage of Asian corn borer (*Ostrinia furnacalis*) in response to elevated [CO_2] were also determined. The results showed that elevated [CO_2] increased the net photosynthesis rate (P_n), stomatal conductance (g_s), transpiration rate (T_r) and water use efficiency (WUE) of foxtail millet by 38.73%, 27.53%, 6.93% and 40.56%, respectively. The maximal photochemical quantum yield (F_v/F_m) and non-photochemical quenching coefficient (NPQ) of foxtail millet leaf photosystem Ⅱ significantly decreased under elevated [CO_2]. Photosystem Ⅱ quantum yield (Φ_{PSII}) and apparent electron transfer rate (ETR) increased, but the change in photochemical quenching destruction coefficient (qP) was not significant. Elevated [CO_2] increased foxtail millet plant height, stem diameter and spikelet number by 3.41%, 13.28% and 13.11%, respectively. Elevated [CO_2] did not significantly affect leaf mass, stem mass, thousand-seed weight or the number of grain per plant at harvest, but the mass of panicle and aboveground per m^2 significantly decreased by 12.8% and 7.44%, respectively. Furthermore, Asian corn borer damage aggravated at filling-stage and harvest under elevated [CO_2]. However, yield did not significantly change under elevated [CO_2]. In conclusion, elevated atmospheric [CO_2] promoted the growth and development of foxtail millet, but increased the risk of insect damage.
Keywords: Elevated CO_2 concentration; Foxtail millet; Photosynthesis; Yield; Asian corn borer

工业革命以来由于人类活动(包括大量使用石油、煤炭等化石燃料以及过度砍伐森林等)使全球大气 CO_2 浓度从工业革命前的 280 μmol·mol^{-1} 上升到目前的 396 μmol·mol^{-1}，到 21 世纪末全球 CO_2 浓度将达到 421~936 μmol·mol^{-1}[1]。大气 CO_2 浓度升高会促进作物的光合作用，有利于作物生物量和产量的提高[2-4]。而光合速率的增加会使植物组织中碳水化合物含量增加，氮的相对含量降低[4]，植物叶片化学成分会发生变化，从而影响昆虫的取食、生长发育及种群动态，并对植物的生产力产生影响[5]。也有研究认为大气 CO_2 浓度升高后植物影响昆虫的化感素的产生会发生变化，并对害虫发生产生影响[6]。戈峰等[7]指出大气 CO_2 浓度升高后，麦蚜(*Sitobion avenae*)产卵期提前，繁殖能力提高；而棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)的种群数量和适合度会下降。

C_4 植物可以利用维管束鞘增加叶肉细胞内的 CO_2 浓度使叶绿体的羧化效率较 C_3 植物更高[8-9]。由于 C_4 植物可以在维管束内浓缩 CO_2 以提高 CO_2 利用效率，大气 CO_2 浓度升高对其的促进作用要小于 C_3 植物，有研究表明，在没有干旱胁迫条件下，大气 CO_2 浓度升高对玉米及 C_4 杂草无显著影响[2,10]。谷子(*Setaria italica*)是 C_4 作物，耐旱耐贫瘠，在我国北方广泛种植。目前关于大气 CO_2 浓度升高对作物影响的研究多集中在 C_3 作物，对 C_4 作物的相关研究较少，C_4 作物生长发育及虫害发生对大气 CO_2 浓度升高的响应机制尚不明确。本研究利用开顶式气室进行大气 CO_2 浓度升高对 C_4 作物谷子影响的研究，进行光合作用、叶绿素荧光及生物量和产量变化的分析，并对后期虫害情况进行了观测，为明确大气 CO_2 浓度升高对谷子的综合影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在山西农业大学试验基地进行(37.42°N, 112.58°E)。种植品种为‘原平小谷’，为山西省原平地区农家品种。

1.2 设施构成与试验设计

整个系统主要由控制系统和 2 个开顶式气室(Open Top Chamber, OTC)组成。2 个气室大小面积(4 m×4 m)一致，间距 4 m。其中一个为对照气室，室内 CO_2 浓度与外界 CO_2 浓度一致(360~400 μmol·mol^{-1})；另外一个气室为处理气室，室内 CO_2 浓度比对照气室高 200 μmol·mol^{-1}，实际控制误差为±30 μmol·mol^{-1}。系统还进行空气湿度和土壤湿度的监测[11]。

谷子于 2013 年 6 月 13 日播种于长×宽×高为 60 cm×40 cm×35 cm 塑料整理箱中，箱底部打 5 个孔用于排水，箱内装土 28 cm 深。每箱种 10 穴，每穴播 3~5 粒种子，长出后每穴留苗 1 株。每个气室种 10 箱。每隔 3~5 d 浇水，水量约相当于 10~20 mm 降水，保证无干旱胁迫。拔节期施尿素和磷酸二铵，折合每盆纯 N 11.04 g 和纯 P 12.24 g，从谷子出苗开始进行 CO_2 释放到收获前停止供气，整个生长期全天 24 h 均进行 CO_2 释放控制，各气室其他管理措施一致。

1.3 光合作用测定

光合作用测定：在谷子抽穗期(播后 54 d)和灌浆期(播后 81 d)进行光合作用的测定。在每个气室分别选取有代表性的谷子 10 株，每株选取完全展开的旗叶用便携式光合气体分析系统(Li 6400, Li-Cor

Inc, Lincoln NE, USA)进行光合作用测定, 测定指标有净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r), 并计算水分利用效率(WUE), WUE=P_n/T_r, 测定时间为 9:00—11:30。高 CO_2 浓度气室内叶室 CO_2 浓度设定在 600 μmol·mol^{-1}, 对照气室内谷子叶片叶室 CO_2 浓度设定在 400 μmol·mol^{-1}。测定时使用内置红蓝光源, 光量子通量密度(PPFD)为 1 400 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 叶室温度设定在 28 ℃。

1.4　叶绿素荧光测定

在谷子抽穗期(播后 54 d)和灌浆期(播后 81 d), 每个气室各选取有代表性的植株 10 株, 每株选取完全展开的旗叶利用便携式荧光分析系统(Mini-PAM, Walz, Effeltrich, Germany)测定叶绿素荧光参数, 白天 8:00—12:00 之间测定光反应并做好标记, 夜间 10:00—12:00 之间测定暗反应, 光反应和暗反应均使用选好的 10 株谷子叶片进行测定。测定叶绿素初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m), 光下最小荧光(F_0')和光下最大荧光(F_m'), 并计算 F_v/F_m、Φ_{PSII}、qP、ETR、NPQ 等叶绿素荧光参数[12]。

1.5　形态指标、生物量产量测定

2013 年 10 月 6 日(播后 117 d)收获所有植株, 自然风干后对全部植株进行株高、茎粗、穗长、分蘖数、小穗数、叶重、茎重、穗重、单株粒数、千粒重、生物量和产量测定。

1.6　玉米螟危害程度统计

在灌浆期(播后 80 d)对玉米螟危害情况进行调查, 根据每株是否有危害症状统计玉米螟数量, 并以相片记录危害情况。收获后对全部植株玉米螟数量进行调查, 统计玉米螟数量。

1.7　统计分析

以 Microsoft Excel 2003 进行数据处理和图表绘制, 以 SAS 8.1 统计软件进行 CO_2 处理的显著性分析。

2　结果与分析

2.1　CO_2 浓度升高对谷子叶片光合生理的影响

大气 CO_2 浓度升高后, 谷子净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)、叶片蒸腾速率(T_r)和水分利用率(WUE)均极显著增加。净光合速率(P_n)两个发育期平均增加 38.73%, 气孔导度(g_s)平均增加 27.53%, 叶片蒸腾速率(T_r)平均增加 6.93%, 水分利用率(WUE)增加 40.56%(表 1)。

表 1　大气 CO_2 浓度升高对谷子光合生理的影响

Table 1　Effect of elevated CO_2 concentration on gas exchange parameters of foxtail millet

生育期(G) Growth stage	处理(T) Treatment	净光合速率 P_n (μmol·m^{-2}·s^{-1})	气孔导度 g_s [mmol(H_2O)·m^{-2}·s^{-1}]	蒸腾速率 T_r [mmol(H_2O)·m^{-2}·s^{-1}]	水分利用率 WUE [μmol(CO_2)·mmol(H_2O)$^{-1}$]
抽穗期 Heading	CK	18.12±0.32	0.12±0.00	1.98±0.26	9.16±0.09
	ECO_2	22.79±1.31	0.14±0.01	1.73±0.11	13.70±0.34
灌浆期 Grain-filling	CK	10.40±0.08	0.06±0.00	1.86±0.00	5.61±0.05
	ECO_2	16.78±0.57	0.09±0.00	2.37±0.02	7.06±0.18
P	G	0.00	0.00	0.11	0.00
	T	0.00	0.00	0.00	0.00
	G × T	0.04	0.00	0.00	0.00

CK: 对照; ECO_2: 高 CO_2 处理。CK and ECO_2 represent the control and elevated CO_2 concentration treatments, respectively. Values are means ± S.E.

2.2　CO_2 浓度升高对谷子叶片叶绿素荧光的影响

大气 CO_2 浓度升高后, 谷子叶片光系统 II 最大光化学量子产量(F_v/F_m)和非光化学淬灭系数(NPQ)显著下降, 光系统 II 实际光化学量子产量(Φ_{PSII})和表观电子传递效率(ETR)显著增加, 而光化学淬灭系数(qP)无显著变化(表 2)。

2.3　CO_2 浓度升高对谷子形态指标的影响

大气 CO_2 浓度升高后, 谷子株高、茎粗和小穗数分别增加 3.41%、13.28%和 13.11%, 谷子分蘖数下降 65.50%, 而穗长和节数无显著变化(表 3)。

2.4　CO_2 浓度升高对谷子生物量和产量的影响

大气 CO_2 浓度升高后, 谷子穗重显著下降 12.08%, 而单位面积叶重、单位面积茎重、千粒重和单株粒数无显著变化。大气 CO_2 浓度升高后, 谷子地上部分生物量下降 7.44%, 而产量无显著变化(表 4)。

2.5　CO_2 浓度升高对谷子玉米螟危害程度的影响

灌浆期后, 我们发现谷子出现玉米螟危害状, 对照中仅有个别植株有危害状, 而高 CO_2 浓度处理气室中大部分植株均有危害状(图 1), 如图 2C 中部分谷子茎被咬断, 谷穗下垂, 图 2D 中大部分植株根部均有玉米螟的粉末状排泄物。鼓粒期和收获期, CO_2 浓度升高后玉米螟危害数量均极显著增加(图 2)。

表 2 大气 CO_2 浓度升高对谷子叶绿素荧光参数的影响

Table 2 Effect of elevated CO_2 concentration on chlorophyll fluorescence parameters of foxtail millet

生育期(G) Growth stage	处理(T) Treatment	F_v/F_m	Φ_{PSII}	ETR	qP	NPQ
抽穗期 Heading stage	CK	0.80±0.00	0.24±0.03	113.81±13.50	0.55±0.05	1.78±0.08
	ECO_2	0.79±0.01	0.37±0.03	173.88±15.06	0.76±0.05	1.42±0.09
灌浆期 Grain-filling stage	CK	0.77±0.01	0.16±0.01	76.67±3.56	1.16±0.66	1.95±0.07
	ECO_2	0.72±0.01	0.25±0.01	115.16±3.00	1.57±0.95	1.68±0.05
P	G	0.00	0.00	0.00	0.19	0.01
	T	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00
	G × T	0.06	0.31	0.31	0.42	0.60

CK: 对照; ECO_2: 高 CO_2 处理; F_v/F_m: 光系统Ⅱ最大光化学量子产量; Φ_{PSII}: 光系统Ⅱ实际光化学量子产量; ETR: 表观电子传递效率; qP: 光化学淬灭系数; NPQ: 非光化学淬灭系数。CK and ECO_2 represent the control and elevated CO_2 concentration treatments, respectively. F_v/F_m: maximal quantum yield of PSⅡ photochemistry; Φ_{PSII}: effective quantum yield of PSⅡ photochemistry; ETR: electron transport efficiency; qP: photochemical quenching coefficient; NPQ: nonphotochemical quenching. Values are means ± S.E.

表 3 CO_2 浓度升高对谷子形态指标的影响

Table 3 Effect of elevated CO_2 concentration on growth of foxtail millet

处理(T) Treatment	株高 Plant height (cm)	穗长 Panicle length (cm)	茎粗 Stem diameter (cm)	分蘖数 Tiller number	小穗数 Spikelets	节数 Number of stem node
CK	93.76±0.76	19.56±0.35	0.51±0.02	0.48±0.08	107.46±2.07	12.85±0.20
ECO_2	96.96±0.98	20.25±0.54	0.58±0.01	0.16±0.06	121.55±4.95	12.59±0.05
P	0.03	0.31	0.01	0.01	0.03	0.22

CK: 对照; ECO_2: 高 CO_2 处理。CK and ECO_2 represent the control and elevated CO_2 concentration treatments, respectively. Values are means ± S.E.

表 4 CO_2 浓度升高对谷子产量和地上部分生物量的影响

Table 4 Effect of elevated CO_2 concentration on yield and above-ground biomass of foxtail millet

处理 Treatment	穗重 Spike weight ($g\cdot m^{-2}$)	叶重 Leaf weight ($g\cdot m^{-2}$)	茎重 Stem weight ($g\cdot m^{-2}$)	千粒重 1000-seed weight (g)	单株粒数 Seeds number per plant	粒重 Seeds weight ($g\cdot m^{-2}$)	地上部生物量 Above-ground biomass ($g\cdot m^{-2}$)
CK	625.07±10.77	172.19±8.12	244.43±14.82	2.65±0.04	4 180.82±432.32	415.03±25.69	1 041.69±25.16
ECO_2	549.57±17.59	170.65±2.98	243.93±2.92	2.68±0.07	4 087.94±132.03	435.89±19.69	964.15±15.69
P	0.01	0.86	0.97	0.68	0.84	0.72	0.03

CK: 对照; ECO_2: 高 CO_2 处理。CK and ECO_2 represent the control and elevated CO_2 concentration treatments, respectively. Values are means ± S.E.



图 1 CO_2 浓度升高对谷子玉米螟危害影响情况

Fig. 1 Effect of elevated CO_2 concentration on Asian corn borer of foxtail millet

A、B 为对照, C、D 为高 CO_2 浓度处理。红色箭头所指处为明显危害状。A, B are CK treatments; C and D are elevated CO_2 concentration treatments. Red arrows show damage caused by Asian corn borer of foxtail millet.

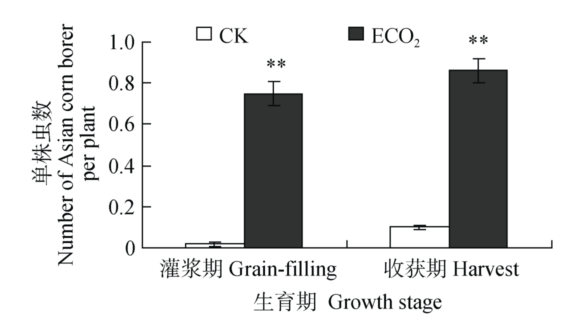


图 2 CO_2 浓度升高对谷子玉米螟发生数量的影响

Fig. 2 Effect of elevated CO_2 concentration on the number of Asian corn borer in foxtail millet

*和**分别表示 0.05 和 0.01 水平上差异显著; CK: 对照; ECO_2: 高 CO_2 处理。* and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively. CK and ECO_2 represent the control and elevated CO_2 concentration treatments, respectively.

3 讨论与结论

大气 CO_2 浓度升高对 C_3 植物的促进作用要高于

C_4 植物[8-9]。本研究发现大气 CO_2 浓度升高使 C_4 作物谷子净光合速率显著增加。大气 CO_2 浓度升高后，C_4 植物光合作用增加的原因是由于这些 C_4 植物在目前大气 CO_2 浓度下没有达到饱和[13]。大部分研究认为，大气 CO_2 浓度升高会使 C_3 和 C_4 植物气孔导度下降[2,14-18]。但也有研究发现一些树木在大气 CO_2 浓度升高后气孔导度没有下降[19-20]。本研究发现大气 CO_2 浓度升高后谷子气孔导度增加，这与其他作物的研究不同。长期大气 CO_2 浓度升高条件下，谷子叶片气孔可能会对高 CO_2 浓度产生适应，使气孔导度的变化与其他作物不同，但有待今后的研究进一步证实。气孔导度的增加会有利于更多 CO_2 进入叶片，这也是该试验条件下谷子叶片净光合速率增加的原因之一。由于气孔导度的增加，谷子叶片蒸腾速率也将增加。这意味着谷子在未来气候条件下水分消耗将会增加，这和其他作物不同[14-15,21]。但由于光合速率的增加，水分利用率仍随 CO_2 浓度升高而增加。

光系统Ⅱ最大光化学量子产量(F_v/F_m)可以反映植物叶片潜在的最大光合能力[22]，大气 CO_2 浓度升高使谷子 F_v/F_m 下降，表明大气 CO_2 浓度升高使谷子光合潜力下降。但由于 CO_2 供应充足，光系统Ⅱ实际光化学量子产量(Φ_{PSII})和表观电子传递效率(ETR)显著增加，这与净光合速率的变化一致。大气 CO_2 浓度升高使谷子非光化学淬灭系数(NPQ)显著下降，这会减少植物化学能以热能的形式消耗[23]，这也将有利于光合作用的提高。

光合作用的增加促进了谷子的生长发育，使谷子株高、茎粗和小穗数显著增加，但由于鼓粒期后大气 CO_2 浓度升高条件下玉米螟危害加重，导致穗重和地上部分生物量下降，而叶重、茎重和产量均无显著变化。这可能是由于大气 CO_2 浓度升高后谷子光合作用增加，会使植物合成更多碳水化合物积累到植株内，而叶片氮含量相对下降，叶片其他化学成分包括以碳为基础的次生代谢物含量也会发生变化，影响昆虫的取食及生长发育[5]。也有研究认为大气 CO_2 浓度升高后植物影响昆虫化感素的产生会发生变化，这会影响昆虫的行为并对害虫发生产生影响[6]。另外，大气 CO_2 浓度升高后植物气孔导度会有所变化，叶片蒸腾速率会相应变化，导致叶片温度发生变化，这些微气象条件的变化也会影响昆虫的行为和种群变化[6]。其他研究表明大气 CO_2 浓度升高会使植物遭受虫害的几率增加[5,7,24]。大气 CO_2 浓度升高后谷子玉米螟危害加重的机制还有待进一步深入研究。未来气候变化条件下谷子受到害虫的危害可能会加重，这或将增加生产中虫害防治方面的成本。

综上研究结果表明：大气 CO_2 浓度升高后，C_4 作物谷子光合作用和水分利用率增加，生长发育受到促进。但由于后期玉米螟危害会加重，导致收获后谷子地上部分生物量下降，产量无显著变化。

参考文献 References

[1] IPCC. Summary for policymakers[M]//Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2013

[2] Leakey A D B, Uribelarrea M, Ainsworth E A, et al. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO_2 concentration in the absence of drought[J]. Plant Physiology, 2006, 140(2): 779–790

[3] 李靖涛, 居辉, 王宏富, 等. 不同水分条件下 CO_2 浓度升高对冬小麦碳氮转运的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 954–963
Li J T, Ju H, Wang H F, et al. Effects of elevated CO_2 concentration on accumulation and translocation of carbon and nitrogen of winter wheat under different water conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(8): 954–963

[4] 郝兴宇, 李萍, 杨宏斌, 等. 大气 CO_2 浓度升高对绿豆生长及 C、N 吸收的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 794–798
Hao X Y, Li P, Yang H B, et al. Effects of enriched atmospheric CO_2 on the growth and uptake of N and C in mung bean[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 794–798

[5] 王晓伟, 姬兰柱, 王桂清, 等. 大气 CO_2 浓度升高对森林食叶昆虫的潜在影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 720–726
Wang X W, Ji L Z, Wang G Q, et al. Potential effects of elevated carbon dioxide on forest leaf-feeding insects[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4): 720–726

[6] Zavala J A, Nabity P D, DeLucia E H. An emerging understanding of mechanisms governing insect herbivory under elevated CO_2[J]. Annual Review of Entomology, 2013, 58(1): 79–97

[7] 戈峰, 陈法军, 吴刚, 等. 我国主要类型昆虫对 CO_2 升高响应的研究进展[J]. 昆虫知识, 2010, 47(2): 229–235
Ge F, Chen F J, Wu G, et al. Research advance on the response of insects to elevated CO_2 in china[J]. Chinese Bulletin of Entomology, 2010, 47(2): 229–235

[8] Liu Z, Sun N, Yang S J, et al. Evolutionary transition from C_3 to C_4 photosynthesis and the route to C_4 rice[J]. Biologia, 2013, 68(4): 577–586

[9] Ghannoum O, Evans J R, von Caemmerer S. Chapter 8 nitrogen and water use efficiency of C_4 plants[M]//Raghavendra A S, Sage R F. C_4 Photosynthesis and Related

CO_2 Concentrating Mechanisms. Netherlands: Springer, 2011: 129–146

[10] Duarte B, Santos D, Silva H, et al. Photochemical and biophysical feedbacks of C_3 and C_4 Mediterranean halophytes to atmospheric CO_2 enrichment confirmed by their stable isotope signatures[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2014, 80: 10–22

[11] 胡晓雪, 杜维俊, 杨珍平, 等. 大气CO_2浓度和气温升高对野生大豆光合作用的影响[J]. 山西农业科学, 2015, 43(7): 798–801

Hu X X, Du W J, Yang Z P, et al. Effect of elevated CO_2 concentration and increased temperature on the photosynthesis of wild soybean[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2015, 43(7): 798–801

[12] Rascher U, Bobich E G, Lin G H, et al. Functional diversity of photosynthesis during drought in a model tropical rainforest-the contributions of leaf area, photosynthetic electron transport and stomatal conductance to reduction in net ecosystem carbon exchange[J]. Plant, Cell & Environment, 2004, 27(10): 1239–1256

[13] Wand S J E, Midgley G F, Jones M H, et al. Responses of wild C_4 and C_3 grass (Poaceae) species to elevated atmospheric CO_2 concentration: A meta-analytic test of current theories and perceptions[J]. Global Change Biology, 1999, 5(6): 723–741

[14] Ainsworth E A, Long S P. What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2[J]. New Phytologist, 2005, 165(2): 351–372

[15] Ainsworth E A, Rogers A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO_2]: Mechanisms and environmental interactions[J]. Plant, Cell & Environment, 2007, 30(3): 258–270

[16] Yu J J, Sun L H, Fan N L, et al. Physiological factors involved in positive effects of elevated carbon dioxide concentration on bermudagrass tolerance to salinity stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 115: 20–27

[17] Vu J C V, Allen Jr L H. Growth at elevated CO_2 delays the adverse effects of drought stress on leaf photosynthesis of the C_4 sugarcane[J]. Journal of Plant Physiology, 2009, 166(2): 107–116

[18] Gao J, Han X, Seneweera S, et al. Leaf photosynthesis and yield components of mung bean under fully open-air elevated [CO_2][J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(5): 977–983

[19] Saxe H, Ellsworth D S, Heath J. Tree and forest functioning in an enriched CO_2 atmosphere[J]. New Phytologist, 1998, 139(3): 395–436

[20] Ellsworth D S. CO_2 enrichment in a maturing pine forest: Are CO_2 exchange and water status in the canopy affected[J]. Plant, Cell & Environment, 1999, 22(5): 461–472

[21] Hao X Y, Li P, Feng Y X, et al. Effects of fully open-air [CO_2] elevation on leaf photosynthesis and ultrastructure of isatis indigotica fort[J]. PLoS One, 2013, 8(9): e74600

[22] 郝兴宇, 韩雪, 李萍, 等. 大气CO_2浓度升高对绿豆叶片光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2776–2780

Hao X Y, Han X, Li P, et al. Effects of elevated atmospheric CO_2 concentration on mung bean leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2776–2780

[23] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444–448

Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(4): 444–448

[24] Niziolek O K, Berenbaum M R, DeLucia E H. Impact of elevated CO_2 and increased temperature on Japanese beetle herbivory[J]. Insect Science, 2013, 20(4): 513–523